Deckblatt

Bachelor-Thesis

in

Medieninformatik

Konzeption, Implementation und Evaluation von Netzwerkkomponenten für eine auf die Lehre spezialisierte Game-Engine

Referent: Prof. Jirka Dell‘Oro-Friedl

Korreferent: Prof. Dr. Ruxandra Lasowski

Vorgelegt am: 31.8. 2100

Vorgelegt von: Falco Böhnke

250100

Im Großacker, 28

79252, Stegen

falco.boehnke@hs-furtwangen.de

Abstract 100-120wort

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden Komponenten für die Netzwerkkommunikation innerhalb des auf Electron basierenden Editors „Fudge“ konzipiert und entwickelt. Dafür werden zuerst die Anforderungen, vorgegeben durch Electron und Fudge selbst, festgelegt.

Im Anschluss daran wird erläutert, welche Varianten von Netzwerkkommunikation in heutigen Videospielen üblich sind, welche Protokolle für die Datenübertragung verfügbar sind und welche existierenden Webtechnologien verfügbar sind um mithilfe der jeweiligen Protokolle zu kommunizieren.

Nach Auswahl der zu verwendenden Technologien wird die Konzeption erläutert und die Komponenten umgesetzt und ihre Funktionsweise mithilfe von UML-Diagrammen und Aktivitäts-Diagrammen dargelegt.

Zum Abschluss wird auf die Zukunftsaussichten und etwaige Möglichkeiten der Weiterentwicklung eingegangen und eine Schlussfolgerung über die Entwicklung von Netzwerkkomponenten für einen didaktischen Spieleeditor gezogen.

In the scope of this work network-components for the game-engine and game-editor “Fudge”, which is based on Electron, have been designed and implemented. To begin with, the requirements given by Electron and Fudge are set. Following that is an explanation on how modern videogames communicate via network, which structures and network protocols they use to transmit data, and which Web technologies meet the requirements of Fudge and Electron and allow network communication. After a choice of Web technology is made, the design itself is elaborated on and the structure and functionality of the components are demonstrated using Unified-Modeling-Language-Diagrams and Activity-Diagrams.

In the conclusion there will be a discussion about future development possibilities, possible expansion plans to the components themselves and the upshot is discussed.

Inhaltsverzeichnis

[Abstract 100-120wort I](#_Toc17799421)

[Inhaltsverzeichnis III](#_Toc17799422)

[Abbildungsverzeichnis V](#_Toc17799423)

[Abkürzungsverzeichnis VII](#_Toc17799424)

[1 Einleitung 1](#_Toc17799425)

[2 Rahmenbedingungen – Theoretische Grundlagen 4](#_Toc17799426)

[2.1 Fudge 4](#_Toc17799427)

[2.2 JavaScript und TypeScript 5](#_Toc17799428)

[2.3 Node.js 7](#_Toc17799429)

[2.4 Electron 8](#_Toc17799430)

[2.5 Analyse gebräuchlicher Netzwerkprotokolle 9](#_Toc17799431)

[2.5.1 ISO/OSI-Modell 9](#_Toc17799432)

[2.5.2 Transmission Control Protocol/Internet Protocol 10](#_Toc17799433)

[2.5.3 User Datagram Protocol 12](#_Toc17799434)

[2.5.4 Evaluation UDP und TCP 13](#_Toc17799435)

[2.6 Netzwerkstrukturen in digitalen Spielen 14](#_Toc17799436)

[2.6.1 Clientserver 14](#_Toc17799437)

[2.6.2 Peer To Peer – Mesh Verbindungen 16](#_Toc17799438)

[2.6.3 „Unechtes“ Peer To Peer 17](#_Toc17799439)

[3 Methodik 19](#_Toc17799440)

[3.1 Webtechnologien für TCP-Kommunikation 19](#_Toc17799441)

[3.1.1 HTTPS/2 19](#_Toc17799442)

[3.1.2 WebSocket 21](#_Toc17799443)

[3.2 UDP Kommunikation 23](#_Toc17799444)

[3.2.1 Datagram-Sockets 23](#_Toc17799445)

[3.2.2 WebRTC 23](#_Toc17799446)

[3.3 Evaluation und Auswahl Webtechnologien 26](#_Toc17799447)

[3.4 Entwicklung 28](#_Toc17799448)

[3.4.1 Die ClientManager 28](#_Toc17799449)

[ClientManagerWebSocketOnly 31](#_Toc17799450)

[Komp 2 32](#_Toc17799451)

[Komp 3 32](#_Toc17799452)

[Komp 4 32](#_Toc17799453)

[4. Praktische Anwendung 32](#_Toc17799454)

[Neue Nachrichten abfangen 32](#_Toc17799455)

[Clientslogik einbauen 32](#_Toc17799456)

[Authoritative Commands strukturieren 32](#_Toc17799457)

[Ids für netzwerkobjete vergeben 32](#_Toc17799458)

[5. Diskussion und Ausblick 33](#_Toc17799459)

Darstellungsverzeichnis

[Abb. 1: Vergleich benötigter Komponenten in einem digitalen Spiel, 1996 und 2004 (Blow, 2004) 1](file:///G:\Bachelor\Dokumente\Thesis\Thesis%20Falco.docx#_Toc17760864)

[Abb. 2: Das ISO/OSI Modell 9](#_Toc17760865)

[Abb. 3: Dreiwege Handshake Verhandlung zwischen zwei Computern 11](file:///G:\Bachelor\Dokumente\Thesis\Thesis%20Falco.docx#_Toc17760866)

[Abb. 4: Gegenüberstellung der Eigenschaften von UDP und TCP in Anlehnung an Vasundhara Ghose 14](file:///G:\Bachelor\Dokumente\Thesis\Thesis%20Falco.docx#_Toc17760867)

[Abb. 5: Darstellung einer Mesh-Verbindung mit 8 Clients 16](file:///G:\Bachelor\Dokumente\Thesis\Thesis%20Falco.docx#_Toc17760868)

[Abb. 6: Mesh Netzwerk bei dem eine Verbindung ausgefallen ist 17](file:///G:\Bachelor\Dokumente\Thesis\Thesis%20Falco.docx#_Toc17760869)

[Abb. 7: Multiple Anfragen mit HTTP/1.1 und nur eine Anfrage mit HTTP/2 20](file:///G:\Bachelor\Dokumente\Thesis\Thesis%20Falco.docx#_Toc17760870)

[Abb. 8: Verhandlungsablauf einer WebRTC Verbindung (developer.mozilla.com) 25](file:///G:\Bachelor\Dokumente\Thesis\Thesis%20Falco.docx#_Toc17760871)

[Abb. 9: UML der ClientManager Interfaces und ihrer Zusammenhänge (Eigene Darstellung) 29](file:///G:\Bachelor\Dokumente\Thesis\Thesis%20Falco.docx#_Toc17760872)

Abkürzungsverzeichnis

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

1 Einleitung

Die Videospielindustrie ist in den letzten Jahren massiv gewachsen. Allein der Markt für Videospiele in den Niederlanden wuchs von 518 Millionen Euro im Jahr 2012 auf 1.65 Milliarden Euro im Jahr 2019 an, mit vergleichbaren Tendenzen, mit Wachstumszahlen von 11% über die letzten 10 Jahre, weltweit (Wijman 2018) (Kazimier 2017). Der starke Anstieg der Umsatzzahlen hat zu einem gesteigerten Konkurrenzkampf innerhalb des Videospielmarktes geführt. Innovationen sind unerlässlich geworden und so sehen sich Entwickler mit immer komplexeren Projektanforderungen konfrontiert (siehe Abb. 1). Insbesondere im Bereich der Netzwerkkommunikation sind die Anforderung an hoch performante Lösungen gestiegen.

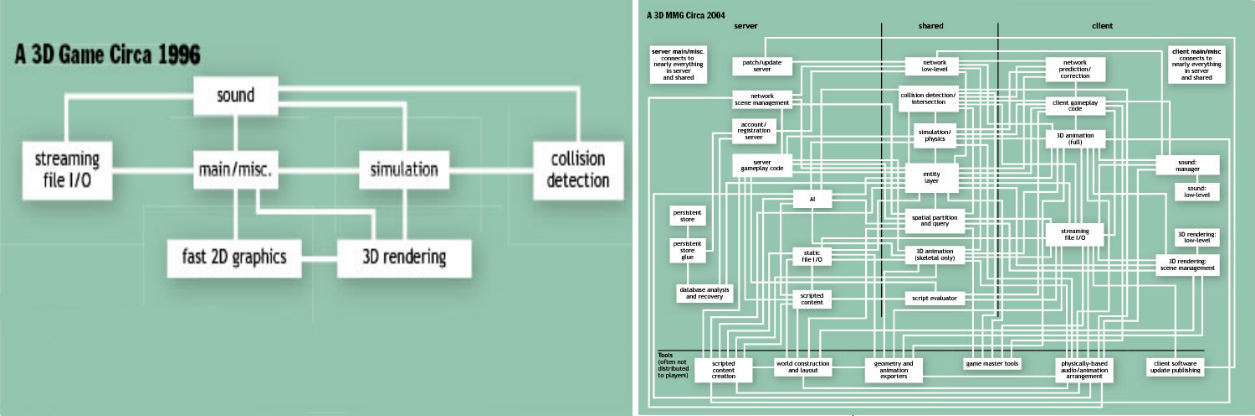


Abb. 1: Vergleich benötigter Komponenten in einem digitalen Spiel, 1996 und 2004 (Blow, 2004)

Spiel-Engines (auch Game-Engines), Entwicklungsumgebungen, die für die Produktion von Videospielen optimiert sind, finden daher verstärkt Einsatz um die Arbeit der Entwickler zu erleichtern und komplexe Komponenten verwendungsfertig bereit zu stellen. Diese fertigen Komponenten sollen durch Automation und Abstraktion fundamentale Arbeiten übernehmen und so Kapazitäten für Optimierung und Kreativität freisetzen. Doch die Undurchsichtigkeit der abstrahierten Systeme und die oftmals komplizierte Struktur der Spiel-Engines (siehe Abb. 1). macht es Entwicklern in Ausbildung schwer die grundlegende Funktionsweise der einzelnen Komponenten eines Videospiels zu erfassen und zu erlernen. So sind Entwickler gezwungen statt grundlegender Konzepte die Funktionsweise ihrer ausgewählten Entwicklungsumgebung zu lernen. Ist dann ein Wechsel auf eine andere Entwicklungsumgebung notwendig, müssen Entwickler sich erneut an die Umgebungsentwicklung anpassen, wobei dort ähnliche Komponenten mitunter andere Funktionsweisen haben. Besonders der Mangel einer von Grund auf für die Lehre konzipierten Game-Engine verschärft diese Problematik weiter.

Um diese Lücke zu füllen wurde das Projekt ‚Fudge‘ von Prof. Jirka Dell‘Oro-Friedl ins Leben gerufen. Fudge ist eine Game-Engine und ein Spiel-Editor, der die Strukturen und Prozesse eines Videospiels offenlegt und Entwickler dennoch mit grundlegenden Funktionalitäten versorgt. Als Spiel-Editor bietet Fudge zusätzlich zu den Basiskomponenten, wie Animation und Physik, eine Oberfläche, mit der sich Spiele editieren und erstellen lassen.

In dieser Arbeit wurden Netzwerkkomponenten entwickelt, die Entwicklern in Fudge die Möglichkeit geben vernetzte Spiele zu entwickeln ohne die notwendigen Komponenten von Grund auf selbst zu schreiben. Dazu wird zuerst der Entwicklungsrahmen mit Fudge und Electron dargelegt. Anschließend wurden die in modernen Spielen üblichen Strukturen zur Kommunikation zwischen Spielinstanzen ermittelt und kurz erläutert. Dazu gehört ebenfalls ein Exkurs in modernen Netzwerkprotokollen, die in der Netzwerkkommunikation üblich sind und daher relevant für die Umsetzung der Netzwerkkommunikation in Fudge.

Aus diesen Informationen erschließen sich die Anforderungen an die Netzwerkkomponenten.

Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen und Anforderungen werden dann die möglichen Technologien ermittelt, die zur Entwicklung verwendet werden können. Diese werden evaluiert und entsprechend ihrer Vorteile und Nachteile ausgewählt.

Darauffolgend wird die Umsetzung der einzelnen notwendigen Netzwerkkomponenten dargelegt und ihr Aufbau mithilfe von Unified Modeling Language Diagrammen dargestellt, sowie ihre Funktionsweise und Ablauf beispielhaft mithilfe von Aktivitätsdiagrammen dargestellt und zusätzlich erläutert.

Abschließend werden die Ergebnisse der Evaluation und Entwicklung zusammengefasst und ein Fingerzeig für eine mögliche Weiterentwicklung der Komponenten gegeben.

2 Rahmenbedingungen – Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Netzwerkkomponenten dargelegt, welche Einschränkungen und Besonderheiten existieren und welche besonderen Anforderungen durch Fudge und Electron entstehen.

2.1 Fudge

Fudge ist eine Open Source Software, die Game-Engine und Spieleditor für die Entwicklung von zweidimensionalen und dreidimensionalen Spielen kombiniert und besonderes Augenmerkt auf didaktisch sinnvolle Strukturen sowie menschenlesbaren Quellcode legt. Der Name gründet sich dabei aus dem vollen Titel der Software: „**F**urtwangen **U**niversity **D**idactic **G**ame **E**ditor“. Als Game-Engine übernimmt Fudge dabei grundlegende Aufgaben wie die visuelle Repräsentation des Spielverlaufs sowie dem allgemeinen Ablauf, Audiowiedergabe und Animationen. Zudem bietet der Editor eine Oberfläche mithilfe derer Änderungen visualisiert, Spiele editiert und zeitgleich dargestellt werden können. Fudge ähnelt in dieser Hinsicht stark den gebräuchlicheren kommerziellen Game-Engines wie Unity, die Unreal Engine und Frostbite, die ebenfalls Editor und Engine kombinieren. Gegenüber diesen kommerziellen Produkten ist Fudge von Grund auf auf die Anwendung im akademischen Rahmen spezialisiert und hat dadurch in diesem Bereich klare Vorteile. Datenformate sind allgemein gültig und menschenlesbar gestaltet, das bedeutet der Quellcode soll sich durch geschickte Namensgebung und klare Strukturen selbst erklären können. Außerdem wird so die Versionskontrolle vereinfacht, da eine Integration mit Anbietern wie GitHub oder GitLab standardmäßig möglich ist. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass Fudge sich auf das Prinzip von „Composition Over Inheritance“(COI) stützt. Dem COI -Prinzip folgend werden Komponenten kreiert die wiederverwendbar sind und aus denen sich andere Klassen zusammensetzen lassen. Außerdem reduziert das COI-Prinzip die Notwendigkeit Gemeinsamkeiten zwischen Klassen zu finden um sie in sinnvolle Familienbäume zusammenzufassen.

Fudge basiert in seiner grundlegenden Struktur auf Webtechnologien, namentlich HTML, CSS, JavaScript und TypeScript, Node.js und Electron in Kombination mit der Browserumgebung Chromium. Diese erlauben in Kombination mit Electron die Verwendung vom Fudge-Editor auf allen üblichen Desktopgeräten. Vollständig gepackte Applikationen in Electron sind autark und daher plattformübergreifend kompatibel. Das bedeutet digitale Software, die in Electron entstanden ist, kann auf vielen verschiedenen Endgeräten, Betriebssystemen und sogar direkt im Browser verwendet werden.

Besonderes Augenmerk liegt im Rahmen dieser Bachelorarbeit auf TypeScript, Node.js und Electron, da aus diesen Technologien Möglichkeiten und Limitationen während der Entwicklung entstehen können. Im Folgenden wird kurz erläutert, was die einzelnen Technologien sind, welche Möglichkeiten und Limitationen sie haben, und inwiefern sie die Entwicklung der Netzwerkkomponenten für Fudge beeinflussen.

2.2 JavaScript und TypeScript

JavaScript ist, wie der Name impliziert, eine Skriptsprache und eine der Kerntechnologien auf denen das World Wide Web aufbaut. Eine Skriptsprache ist dabei explizit designed um auf ein existierendes System oder eine vorhandene Entität aufzubauen. Als solches folgt JavaScript dem international anerkannten ECMAScript Standard. Dieser Standard besagt welche Typen, Werte, Objekte, Eigenschaften, Funktionen und Programm Syntax sowie Semantik von JavaScript angeboten und unterstützt werden muss.

JavaScript ist zudem eine interpretierte, keine kompilierte Programmiersprache Kompilation bedeutet, dass Quellcode von einer Software, dem Compiler, in Maschinen Code übersetzt wird. Das Ergebnis ist ein lauffähiges Programm aus Maschinen Code. Ein Interpreter dagegen liefert das Ergebnis eines Quellcodes zurück, also das Ergebnis einer Berechnung. Allerdings muss beachtet werden, dass die Grenzen zwischen interpretierten und kompilierten Sprachen immer mehr verwischen, da mit der V8 JavaScript Engine auch JavaScript zu Maschinencode kompiliert werden kann.

Da JavaScript in jedem modernen Browser nutzbar ist können angehende Entwickler schnell erste Erfolge erzielen. Zudem lassen sich komplexe JavaScript Abläufe Stück für Stück programmieren und zeitgleich im Browser auf ihre Funktionalität testen. Dies erleichtert den Einstieg erheblich und senkt so die Lernkurve stark ab, da Experimente zum Verständnis kaum Zeit kosten.

Außerdem existieren viele Fallstricke anderer Programmiersprachen in JS nicht, unter anderem Einschränkungen durch Typisierung und komplexe Strukturen durch multiple Vererbung, die Erfahrung und solide Planung voraussetzen.

Ein weiterer Vorteil der JavaScript als Grundbaustein des World Wide Web zementierte ist die Codeausführung auf Seiten des Clients. Ein Client ist eine Partei, die an der Netzwerkkommunikation teilnimmt, es kann ein Server oder ein regulärer Computer sein. Bei JavaScript kann ein Server lediglich den Quellcode des Programms an den Client liefern, das Programm wird jedoch im Browser des Clients ausgeführt. So lassen sich Daten bis zu einem gewissen Grad ohne zusätzliche Anfragen an den Server validieren. Dies geschieht auf Kosten der Sicherheit. Browser injizierte JavaScript Programme können Daten auslesen und verschicken und sogar Schäden an den ausführenden Geräten selbst verursachen, weswegen JavaScript in Browserumgebungen von der direkten Verwendung von Netzwerk-Sockets ausgeschlossen ist - ein Socket ist ein Zugang der auf einen bestimmten Port fokussiert ist. Informationen können über die Internet Protocol Adresse und einen Port eindeutig zugewiesen und einer Applikation zugeordnet werden.

Die fehlende Typisierung und der nicht existente Debugger, Software die Fehler im Quellcode erkennt und ausliest, erschweren die Wartung ungemein und führen häufig zu Laufzeitfehlern die nur durch zeitintensive Fehlersuche behoben werden können. Dazu kommt, dass die Verwendung von Objekt-orientierten Prinzipien durch die fehlende Typisierung und ausschließlich einfache Vererbung viel Kreativität erfordert.

Dennoch erfreut sich JS sehr großer Beliebtheit und ist heute, 2019, der defacto Standard für moderne Browser, unterstützt von Google, Facebook und Mozilla.

Einige der Nachteile von JavaScript lassen sich jedoch mithilfe von TypeScript beheben und umgehen. TypeScript ist eine von Microsoft entwickeltes, typisiertes Super Set für JavaScript. Quellcode wird in TypeScript geschrieben und der TypeScript eigene Compiler wandelt den Code in funktionierendes JavaScript um. Durch die nun vorhandene Typisierung und einen TypeScript eigenen Debugger sind Fehler jedoch bereits im Quellcode leicht ersichtlich. Klassen, Objekte und ihre Funktionen lassen sich deklassieren und festlegen; sind eindeutig definiert und können während der Laufzeit nicht ungewollt verändert oder überschrieben werden. So lassen sich objektorientierte Programmierprinzipien erfolgreich umsetzen, der Quellcode ist übersichtlich strukturiert, die Wartbarkeit ist simpel und der Quellcode lässt sich mit allgemeingültigen Modellen, wie der Unified Modelling Language, darstellen und dokumentieren. Die Beliebtheit von TypeScript steigt ob dieser Vorteile stetig an und ersetzt mehr und mehr Web-Entwicklung mit reinem JavaScript.

Für die Entwicklung in Fudge wird ausschließlich TypeScript verwendet, da der resultierende, noch nicht kompilierte Quellcode sich menschenlesbar gestalten lässt, ein Debugger zur Verfügung steht und sich der Quellcode durch objektorientierte Programmierung in modulare, wiederverwendbare Komponenten aufspalten lässt. Damit kann das COI-Prinzip innerhalb von Fudge befriedigt werden.

2.3 Node.js

Node.js ist eine Laufzeitumgebung, die alle Komponenten für die Ausführung von JavaScript Code beinhaltet. Node.js basiert, wie JavaScript selbst, auf der V8 JavaScript Runtime Engine und wird von deren Compiler zu Maschinen Code übersetzt. Node.js ist durch seine autarke Natur geeignet um in Serverumgebungen Verwendung zu finden. Dies ist möglich, da Node.js eine eigene Laufzeitumgebung einpackt und stets zur Verfügung steht.

Außerdem bietet Node.js, im Gegensatz zu reinem JavaScript dessen Event-Schleife nur auf einem Thread arbeitet, die Möglichkeit asynchron auf mehreren Threads zu arbeiten und so nicht blockierend Anfragen zu verarbeiten - Ein Thread ist ein eine unabhängige Dateneinheit, die einem Kern eines Computerprozessors zugeordnet wird. So lassen sich viele Anfragen gleichzeitig statt nacheinander abarbeiten. Dies ist besonders kritisch in einer Serverumgebung da jede Anfrage nacheinander einzeln bearbeitet werden müsste und sich Anfragen dadurch gegenseitig blockieren. Durch die asynchrone Arbeitsweise kann Node.js nicht-blockierende Input/Output Requests anbieten.

Node.js erfreut sich dabei ebenso wie JavaScript großer Beliebtheit wodurch viele Bibliotheken und Module frei zur Verfügung gestellt werden. Über den node.js eigenen Package-Verwalter „npm“ können Pakete abgerufen, installiert und integriert werden. Dies macht Node.js kompatibel mit den meisten geläufigen Programmiersprachen, APIs und Programmen.

Node.js verpackt Netzwerkfunktionalitäten, auf die mittels TypeScript zugegriffen werden kann und Node.js ist daher für die Entwicklung von Netzwerkkomponenten in Fudge unerlässlich.

2.4 Electron

Electron basiert auf dem Projekt Atom Shell das im Jahr 2013 begann und im Jahr 2015 zu Electron umbenannt wurde. Initial war es als plattformübergreifender Text Editor gedacht, in welchem der Nutzer mit Webtechnologien wie JavaScript, CSS und HTML arbeiten kann.

Electron kombiniert die Chromium Rendering Library, die ein open-source Fundament für Google Chrome darstellt, mit Node.js und der V8 JavaScript Engine in einer einzigen Laufzeitumgebung. Dadurch können Programme die in JavaScript oder Node.js geschrieben wurden unabhängig vom Endgerät verwendet werden, vorausgesetzt das Electron-Paket ist für das Endgerät gedacht. Diese Programme sind so plattformübergreifend kompatibel und können sowohl für Desktop, Mobile und Browserumgebungen genutzt werden. Webentwickler können mithilfe von Electron vollwertige Desktopsoftware und sogar Applikationen für Smartphones erstellen, ohne von ihren bekannten Technologien abweichen zu müssen. Wichtig zu beachten ist jedoch, dass Electron auf einer Browserumgebung aufbaut und dementsprechend die gleichen Einschränkungen und Limitationen der handelsüblichen Browser aufweist, seien dies nun Sicherheitsbestimmungen über den Versand von Informationen oder Inkompatibilitäten mit manchen Webtechnologien.

2.5 Analyse gebräuchlicher Netzwerkprotokolle

2.5.1 ISO/OSI-Modell

Das ISO/OSI Modell (kurz: OSI-Modell) ist ein Produkt der International Organization for Standardization (ISO), dass Internettechnologien in Schichten aufteilt und standardisiert. Da die Gesamtheit der Funktionalitäten der Datenkommunikation zu komplex sind um verständlich zu sein, wurden „… gemäß dem Konzept der virtuellen Maschinen mehrere Schichten ausgedacht, um die Materie etwas übersichtlicher zu beschreiben“ (TCPUNDUDPINTERNALS ZITIEREN SEITE 14). Das so entstandene OSI-Modell unterteilt dabei die Funktionalitäten der Datenkommunikation in Sieben solche Schichten, von denen jede Schicht mit der darunterliegenden über Schnittstellen kommunizieren kann.

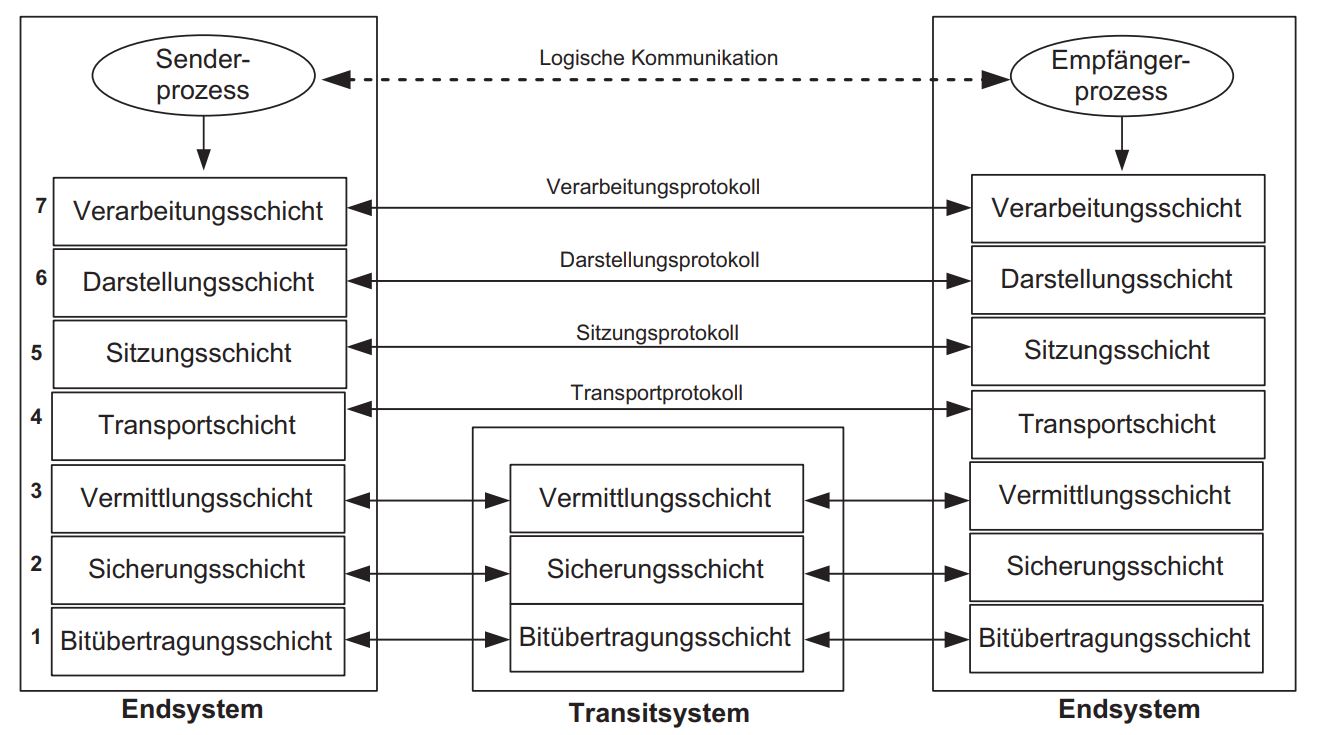


Abb. 2: Das ISO/OSI Modell

Quelle: Mandl, 2017, S. 14

Schichten 1-4 (siehe Abb. 2) werden „…gemeinsam als Transportsystem bezeichnet.“ (ZITAT BUCH) Wichtig hierbei ist, die Aufgaben der einzelnen Schichten im Transportsystem zu unterscheiden: Schicht 2 und Schicht 3 dienen dazu Verbindungen zwischen Rechnern herzustellen. Schicht 2 ermöglicht direkte Ende-zu-Ende Verbindungen zwischen Rechnern unter Verwendung von Protokollen wie dem Internet Protocol (IP). Schicht 3 fügt die Möglichkeit hinzu in einem Netzwerk, das heißt über mehrere Knoten, eine Ende-zu-Ende Verbindung zwischen Rechnern herzustellen. Für diese Arbeit relevant ist die vierte Schicht, die sogenannte Transportschicht. Diese „… kümmert sich um die Ende-zu-Ende-Kommunikation zwischen zwei Prozessen auf einem oder unterschiedlichen Rechnern.“ (ZITAT) Sie ist dafür zuständig Software, im Falle von Fudge sind es digitale Spiele oder interaktive Anwendungen, direkt miteinander kommunizieren zu lassen. Diese Kommunikation wird über sogenannte Packets bewerkstelligt. Packets bestehen aus einem Header mit Informationen wie Quelle, Ziel und Status und einem Körper, der die Nutzdaten beinhaltet (ZITAT). Der Transportschicht stehen zwei hier relevante Datenprotokolle zur Übertragung und Zuweisung dieser Packets zur Verfügung: das User-Datagram-Protocol (UDP) und das Transmission-Control-Protocol(TCP). Transmission Control Protocol und Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) sind zu unterscheiden: TCP/IP bezeichnet die gesamte Protokollfamilie der Kommunikation über Netzwerke und Internet. Der Name erschließt sich aus den zwei wichtigsten Protokollen, dem TCP und dem IP. Dementsprechend bezeichnet TCP ein spezifisches Protokoll innerhalb der TCP/IP Gruppe. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ausschließlich auf das spezifische TCP eingegangen. Im Folgenden wird dazu näher auf das TCP und das UDP eingegangen.

2.5.2 Transmission Control Protocol/Internet Protocol

Das Internet Protocol ist die erste vom Übertragungsmedium unabhängige Schicht des OSI-Modell. Es erlaubt Computer in logische Einheiten, genannt Subnetze, zu gruppieren und die Computer dann mit eindeutigen Adressen, den IPs anzusprechen. Ein Beispiel für eine solche IP ist der localhost, der eigene Netzwerkanschluss, eines jeden Geräts der bei Desktop-Computern unter der IP 127.0.0.1 zu finden ist

Mit IP als zugrundeliegender Schicht im OSI-Modell hat TCP sich zum heute meistgenutzten Protokoll der Netzwerkkommunikation über das Internet aufgeschwungen. TCP ist ein zuverlässiges, verbindungsorientiertes Protokoll. Zuverlässig im Kontext der Netzwerkkommunikation bedeutet eine Garantie für die Ankunft der Packets, in der korrekten Reihenfolge, seitens TCP. Sollte ein Packet verloren gehen, beispielsweise durch eine schlechte Internetverbindung, so werden alle Packets zurückgehalten bis das verlorene Packet nachgesendet und empfangen wurde. Dies macht TCP das Protokoll der Wahl, wenn Packets und ihre Daten nicht verändert werden, nicht verloren gehen und nicht dupliziert werden sollen, und zudem in der richtigen Reihenfolge eintreffen müssen.

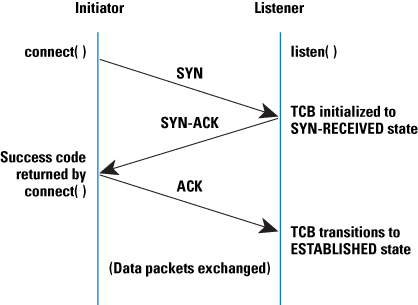
Verbindungsorientiert bedeutet zwingend: eine Verbindung zwischen Clients, per Drei Wege Handshake Verhandlung (siehe Abb. 3) muss erstellt werden, ehe Packets versendet werden können. Dies erfordert die Initiierung der Verbindung seitens eines Computers, eine Anerkennung der Verbindungsanfrage seitens des Empfängers und schlussendlich eine Bestätigung des Initiators. Sind diese drei Schritte erfolgreich, so wird eine Verbindung zwischen den Computern geöffnet.

Abb. 3: Dreiwege Handshake Verhandlung zwischen zwei Computern

Dadurch erlaubt TCP eine „… vollduplex-fähige, bidirektionale virtuelle Verbindung zwischen Anwendungsprozessen“. Dies ermöglicht es allen beteiligten Kommunikationspartnern zu beliebigen Zeitpunkten und sogar zeitgleich Nachrichten zu senden und zu empfangen. (ZITAT)

Für die Verwendung in Login-Servern oder Lobby/Matchmaking-Servern bietet sich TCP an, jedoch kostet der Verbindungsaufbau Zeit und der Datenaustausch erhält eine größere Latenz, Verzögerungen in Übertragung und Interpretation der Packets, durch die ausführlichen Header Daten.

TCP eignet sich dagegen nicht für den Datenaustausch innerhalb von Echtzeitanwendungen, die Daten zeitkritisch empfangen. Durch die zuverlässige Verbindung, die TCP erfordert, müssen Packets in der korrekten Reihenfolge eintreffen. Geht ein Packet verloren wird der komplette Datenverkehr eingestellt bis das verlorene Packet eintrifft oder es durch Nachsenden empfangen wird. Dies nennt sich Netzwerkstau. Besonders deutlich wird dies in Echtzeitspielen oder Audioübertragungen: Geht ein Packet in einem Spiel verloren wird die Verbindung des Clients solange blockiert, bis das Packet eintrifft. In dieser Zeit findet keine Aktualisierung des Spielstandes statt und eine merkliche Verzögerung tritt ein. Ebenso ist dies bei der Übertragung von Audio oder Video der Fall. Bild und Ton werden solange angehalten bis das Packet eintrifft. So fehlt zwar keine Information die Verzögerung wird stattdessen als eindeutiges Ruckeln wahrgenommen. Dadurch disqualifiziert sich TCP für die Kommunikation zwischen Echtzeitspielen, da keine gute Netzwerkverbindung der Clients gewährleistet werden kann. Allerdings kann TCP gut für den initialen Verbindungsaufbau zu einem Login-Server oder einer Spiel-Lobby verwendet werden, da dort zuverlässige Kommunikation wichtiger ist als zeitkritische Verarbeitung.

In der Funktionsweise ist TCP vergleichbar mit einer traditionellen Telefonverbindung: Der Anrufer äußert einen Kommunikationswunsch, der Angerufene erkennt diesen Wunsch an indem er den Anruf entgegennimmt und seinen Kommunikationsbereitschaft mit einem Gruß signalisiert. Diese erkennt der Anrufer mit einem Gegengruß an und die Kommunikation kann beginnen.

2.5.3 User Datagram Protocol

Im Gegensatz zum TCP steht das User Datagram Protocol. Es ist weder verbindungsorientiert, noch zuverlässig. Es eignet sich besonders für die Übertragung von Packets deren Verlust nicht systemkritisch ist, da der Empfang der Daten nicht garantiert wird. Gleichzeitig besteht keine Gefahr eine Verbindung bis zum Eintreffen eines Packets zu blockieren. Netzwerkstaus, eine Eigenheit von TCP, können so vermieden werden. Zudem ist UDP nicht Verbindungsabhängig, die Kommunikation erfolgt direkt über UDP-Kommunikationsendpunkte. Diese bestehen aus einem Tupel das zum einen die IP und zum anderen den UDP Port der Anwendung enthält. Dies erlaubt außerdem den Versand von Broadcast Nachrichten, Nachrichten die ungezielt losgeschickt und von allen zuhörenden Endgeräten empfangen werden. Außerdem ist der Header eines UDP Packets (auch: Datagram) wesentlich leichtgewichtiger, wodurch die Latenz bei Versand und Empfang der Nachrichten reduziert ist. Datagramme sind in der Nachrichtengröße ihrer Packets, im Gegensatz zu TCP Packets, eingeschränkt. UDP ist also besonders für kleine, rasant zu verschickenden Nachrichten geeignet.

Die Unzuverlässigkeit von UDP fordert von Entwicklern Nachrichten zu validieren. Verlorene Packets oder Packets die in der falschen Reihenfolge eintreffen müssen validiert, verworfen, neu angefordert oder geordnet werden. So können beispielsweise Zeitstempel mitgeschickt werden. Packets die später, aber mit einem früheren Zeitstempel, eintreffen werden verworfen. Diese Eigenheit kann zusätzliche Arbeit seitens der Entwickler erfordern, im Rahmen von Fudge wird eine umfassende Validierung der Packets voraussichtlich nicht nötig sein.

Das UDP ist vergleichbar mit einem Radiosender: Unabhängig davon ob es Empfänger gibt werden Informationen verschickt. Clients die ihre Radios auf den Empfang der Funkwellen justieren werden die Nachrichten empfangen, andere nicht. Gehen Teile der Übertragung verloren, so setzt die Übertragung aus und beginnt erneut sobald neue Informationen empfangen werden.

Durch diese Eigenschaften wird die Übertragung von Spielständen oder Tastendrücken in digitalen Spielen heutzutage größtenteils per UDP gehandhabt. Verlorene Packets haben selten kritische Auswirkungen auf die Systeme des Spiels, störendes Ruckeln durch Netzwerkstau werden vermieden und durch die Broadcast-Eigenschaften von UDP lassen sich mehr Clients mit weniger Aufwand als bei TCP ansprechen.

2.5.4 Evaluation UDP und TCP



Abb. 4: Gegenüberstellung der Eigenschaften von UDP und TCP in Anlehnung an Vasundhara Ghose

Quelle: Ghose, keine ahnung, keine ahnung

Wie in Abbildung 4 zu sehen, haben beide Technologien ihre Besonderheiten, die sie in ihrem Nutzen voneinander trennen. Für die Kommunikation in Echtzeitspielen ist dabei UDP aufgrund der fehlenden Ordnung und inhärenten Unzuverlässigkeit zu bevorzugen.

TCP dagegen bietet sich besonders für Lobbyserver, Login Server und Dateitransfers an, da die Daten garantiert und in der korrekten Reihenfolge gesendet werden. Dies erspart auch die Notwendigkeit die Packets zusätzlich validieren zu müssen, da TCP diese Aufgabe selbstständig übernimmt.

2.6 Netzwerkstrukturen in digitalen Spielen

2.6.1 Clientserver

Eine der ältesten und meist genutzten Varianten der Netzwerkkommunikation in Spielen stellt die Client-Server Struktur dar. Dabei gibt es einen dedizierten Server der als Dreh und Angelpunkt für alle Clientinteraktionen zwischen Spiel und Clients dient. Der Server arbeitet Anfragen ab, synchronisiert Spielstände (auch: Gamestates), validiert Eingaben der User und leitet relevante Informationen an die Clients weiter. Dies hat sich insbesondere in rasanten Spielen wie Multiplayer-Online-Shootern wie beispielsweise Apex Legends, Overwatch und Fortnite, durchgesetzt, da die Server in einer stabilen Infrastruktur aufgebaut werden und ganztägig betrieben werden können. Ruckelfreie und stetige Spielerlebnisse sind so ermöglicht. Latenz und Verbindungsabbrüche sind hierbei üblicherweise vom Client, nicht dem Server, ausgelöst. Zudem erlaubt eine Client-Server-Struktur die Kontrolle des Spielerlebnisses, was bei der heutigen Beliebtheit von E-Sport fähigen Spielen wichtig geworden ist. Gleichzeitig erfordert diese Art der Netzwerkkommunikation eine solide Serverinfrastruktur, da ansonsten das Spielerlebnis für alle Spieler gleichermaßen unter Lags leidet.

Die Client-Server-Struktur ist die häufigste Struktur der Netzwerkkommunikation, die in digitalen Spielen verwendet wird. Sie bietet, adäquate Serverinfrastruktur vorausgesetzt, die geringste Latenz bei der Verarbeitung von Daten, erlaubt es viele dutzend oder sogar hunderte von Spielern in das Spiel einzubinden und erlaubt volle Kontrolle über das Spielgeschehen, einschließlich der Kontrolle über die Clients die den Service nutzen dürfen und wie lange der Service zur Verfügung steht. Hohe initiale Kosten, Betriebskosten und Wartungskosten seitens der Betreiber, sowie das nötige Fachwissen für den Aufbau einer sogenannten Server-Farm begrenzen die Verwendung jedoch auf Studios und Publisher mit großen Ressourcen. Client-Server-Strukturen finden bei unabhängig entwickelten Spielen selten Verwendung.

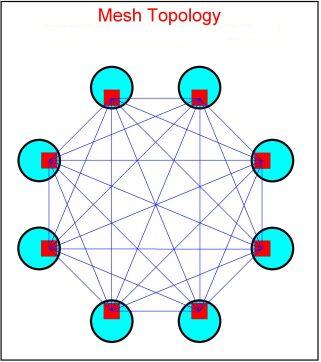


Abb. 5: Darstellung einer Mesh-Verbindung mit 8 Clients

Quelle: http://webpage.pace.edu/ms16182p/networking/mesh.html

2.6.2 Peer To Peer – Mesh Verbindungen

Seltener genutzt wird das Peer-To-Peer Verbindungsverfahren. Hierbei gibt es keinen dedizierten Server. Stattdessen verbinden sich alle Clients miteinander und erzeugen ein sogenanntes Mesh (auch: Netz).

Spielstände werden zwischen den Clients synchronisiert und Eingaben gehen von den initiierenden Clients in das Netzwerk und werden von den empfangenden Clients verarbeitet. Dies erlaubt es serverlose Multiplayerspiele zu erschaffen und so die Kosten für die Bereitstellung und Wartung der Serverinfrastruktur zu umgehen. Besonders bei kleineren Studios und einzelnen Entwicklern kann dies ein entscheidendes Kriterium sein. Peer To Peer Verbindungen sind potentiell gefährlich für das Spielerlebnis. Oftmals leiden Clients mit schwacher Computerhardware unter den großen Leistungsanforderungen einer Peer To Peer Verbindung und leiden daher unter Verzögerungen des Spielgeschehens. Es lassen sich dadurch kaum Multiplayerspiele mit vielen Spielern realisieren. Die Organisation eines Peer To Peer Meshes erzeugt eine Vielzahl von zu verwaltenden Verbindungen für jeden Client: In jedem Mesh muss jeder Client n(Clientanzahl)-1 Verbindungen aufrechterhalten und verwalten. Außerdem gibt es keine zentrale Validierung der ins Netzwerk gesendeten Daten. Dadurch ist ein Peer To Peer Mesh anfällig für Dateninjektionen.

Gut aufgebaute Mesh-Netzwerke bieten allerdings die Möglichkeit eine Verbindung zu überbrücken (siehe Abb. 6). So kann die Kommunikation trotz des Verlustes einer oder mehrerer Verbindungen aufrechterhalten werden indem der Datenverkehr über andere, funktionierende Verbindungen umgeleitet wird.

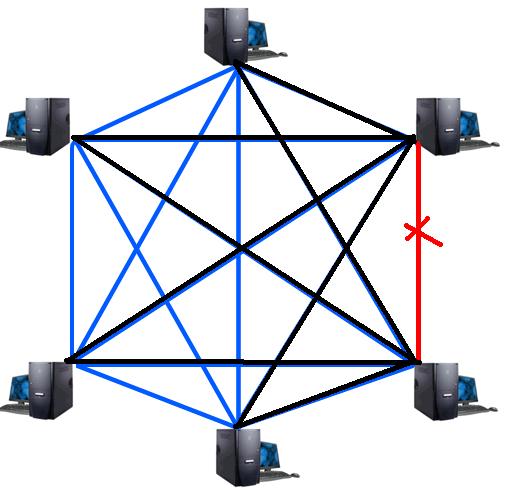


Abb. 6: Mesh Netzwerk bei dem eine Verbindung ausgefallen ist

Quelle: http://webpage.pace.edu/ms16182p/networking/mesh.html

Diese Art der Netzwerkkommunikation findet hauptsächlich in kleineren, unabhängig entwickelten digitalen Spielen Anwendungen, deren Spielerzahl häufig im Rahmen des Spieldesigns auf wenige Spieler beschränkt ist. Die Einfachheit der Entwicklung und der vollständige Verzicht auf die Bereitstellung einer Serverinfrastruktur sind klare Vorteile dieser Verbindungsmethode.

2.6.3 „Unechtes“ Peer To Peer

Bei unechtem Peer To Peer handelt es sich eigentlich um eine Client-Server Variante. Hierbei werden Clients üblicherweise per Matchmaking oder Lobbysystem zusammengeführt. Der Matchmaking/Lobbyserver organisiert dann die Verbindungen indem er einen Client als „Host“ auswählt, also Client und Server in Kombination, und die Rolle des Servers für alle anderen Clients übernimmt. Anschließend verbinden sich alle Clients innerhalb der Lobby mit diesem Peer-Server (übersetzt: Gleichgestellten-Server). In der Funktionsweise agiert diese Verbindungsart dann gleich wie eine normale Client-Server Verbindung. Dies erlaubt es dem Anbieter nur den Server für das Matchmaking bereit zu stellen. Die Belastung für den Matchmaking-Server ist wesentlich geringer als bei einer reinen Client-Server Struktur und Latenzen zu diesem Server spielen keine Rolle. So können selbst schwache Server-Infrastrukturen ihre Aufgaben adäquat erfüllen. Auf der Seite des Spiels hat der Host, der sich selbst als Spieler mit dem lokalen Server verbindet, stets eine Verzögerung von 0ms. Dies bietet einen gewaltigen Vorteil gegenüber den anderen Clients, deren Kommunikationslatenz substantiell höher ausfällt. Außerdem ist diese Verbindungsart, ähnlich wie reines Peer To Peer, anfällig für Hosts mit schwacher Hardware, da nicht nur das digitale Spiel dargestellt, sondern auch die Spielverwaltung im Serverteil übernommen werden muss. Ein unerwarteter Verbindungsabbruch seitens des gewählten Hosts erfordert zusätzliche Ausnahmebehandlungen und Vorausplanung der Entwickler. Im Falle von Verbindungsabbrüchen ist eine solche Ausnahmebehandlung üblicherweise als „Host Migration“ bekannt. Dabei wird ein neuer Host bestimmt der die Aufgaben des verlorenen Hosts übernimmt. Anschließend werden die Spielstände erneut synchronisiert und das Spiel wird fortgesetzt. Dies führt zu teils sekundenlangen Unterbrechungen. Unechtes Peer To Peer findet aufgrund dieser Eigenschaften nur noch sehr selten in größeren Spielen Verwendung. Ein namentliches Beispiel ist „For Honor“ von Ubisoft Montreal, dessen Verwendung dieser Verbindungsart immer wieder für Kontroversen gesorgt hat.1,2

3 Methodik

Im letzten Kapitel wurden Anforderungen und Voraussetzungen an Webtechnologien gestellt, die sie für die Entwicklung von Netzwerk Komponenten erfüllen müssen. Im Folgenden werden mögliche Kandidaten vorgestellt und auf ihre Eignung geprüft.

Auswahl der kompatiblen Technologien Darstellung als Grafik zeitstrahl wo inkompatible Sachen dann runterfallen sozusagen oder eher plus minus rot grün Tabelle

3.1 Webtechnologien für TCP-Kommunikation

3.1.1 HTTPS/2

HTTPS/2 ist eine Weiterentwicklung des für das Internet fundamentalen HTTP/1.1 Protokolls. HTTP dient als einfaches Anfrage-Antwort Protokoll, mithilfe dessen Anfragen an einen Server geschickt und von diesem mit den gewünschten Daten beantwortet werden können. HTTP stellt die Grundlage für die Kommunikation im Internet dar, erlaubt den Austausch von Hypertext Formaten und die Lokalisierung von Ressourcen mithilfe von URLs. HTTP liegt im OSI-Modell (siehe Abb. 2) auf der siebten, der Anwendungsschicht. HTTP erwartet eine zuverlässige Verbindung und baut als solches auf dem TCP der vierten OSI-Model Schicht auf (siehe Abb. 2).

HTTP/2 basiert auf dem von Google entwickelten SPDY-Protokoll und wurde im Jahr 2015 veröffentlich. Ziel dieser Weiterentwicklung ist es jedoch nicht, das alte Protokoll HTTP/1.1 abzulösen. Vielmehr soll HTTP/2 die Möglichkeiten der Internetkommunikation erweitern, sofern alle Parteien der Kommunikation mit HTTP/2 kompatibel sind.

HTTP/2 erreicht im Gegensatz zu HTTP/1.1 wesentlich bessere Datenraten und Latenzzeiten. Dies wird durch den Wechsel von textbasierten Übertragungen auf Binär Code basierte Übertragungen erreicht. Dies vereinfacht das parsen, umwandeln in unterschiedliche Datenformate, der erhaltenen Daten. Zusätzlich komprimiert das HTTP/2 Protokoll die Headerbereiche, wodurch mehrere Bytes pro Anfrage eingespart werden können und die Kombination multipler Header zu nur einem einzelnen möglich ist. Dies spart zusätzlich Datenvolumen ein und erlaubt für schnellere Kommunikation.

Eine weitere, und womöglich die größte, Änderung gegenüber HTTP/1.1 ist die Möglichkeit des Multiplexing.



Abb. 7: Multiple Anfragen mit HTTP/1.1 und nur eine Anfrage mit HTTP/2

Quelle: Das Interwebs https://medium.com/@factoryhr/http-2-the-difference-between-http-1-1-benefits-and-how-to-use-it-38094fa0e95b

Multiplexing bedeutet, dass über eine einzelne Verbindung, meistens TCP, mehrere Anfragen geschickt werden können ohne für jede einzelne Anfrage eine neue Verbindung herstellen zu müssen (siehe Abb. 5). So ist nur einmal eine Verbindungsverhandlung notwendig wodurch die Anzahl der gesendeten Header von fünf, zwei seitens des Clients für den Drei Wege Handshake und drei weitere für die jeweiligen Ressourcenanfragen, auf drei reduziert wird. Dies stellt eine Dateneinsparung von 40% dar.

Trotz all dieser Einsparungen ist HTTP/2 dennoch nicht für die Verwendung in Echtzeitspielen geeignet, da auch hier eine zuverlässige und geordnete Abfolge an Packets erwartet wird: Netzwerkstau ist also immer noch ein Problem. Außerdem müssen Verbindungsabbrüche und Wiederverbindungen von Clients explizit gehandhabt werden, da HTTP/2 diese Funktionalitäten nicht nativ mitbringt.

3.1.2 WebSocket

Das WebSocket Protokoll baut auf HTTP/1.1 auf und erweitert es um die Fähigkeit bidirektionale Echtzeitdatenverbindungen zu erstellen und aufrecht zu erhalten. Das WebSocket Protokoll folgt dem HTML5 Paradigma der Einfachheit und Standardisierung und wird vom World Wide Web Consortium (W3C) offiziell unterstützt. Die Spezifikationen des Protokolls sind zudem in RFC6455 festgelegt worden und können so jederzeit eingesehen werden.

WebSocket etabliert eine Verbindung mithilfe eines HTTP Upgrade Requests (vergleiche Abbildung TODO)

Wird die Request seitens des Empfängers bestätigt wird das verwendete Netzwerkprotokoll auf WebSocket aufgerüstet und die Kommunikation kann beginnen. Grundsätzlich kann so jedem Gerät ein Upgrade Request gesendet werden, da HTTP die Grundlage der Internet Kommunikation darstellt. Ist die Verbindung aufgestellt wird die TCP Verbindung, im Gegensatz zu HTTP/1.1, aufrecht- und offen gehalten. So bricht WebSocket aus dem HTTP üblichen Request-Response Zyklus aus und ermöglicht asynchronen und zeitunabhängigen Nachrichtenaustausch.

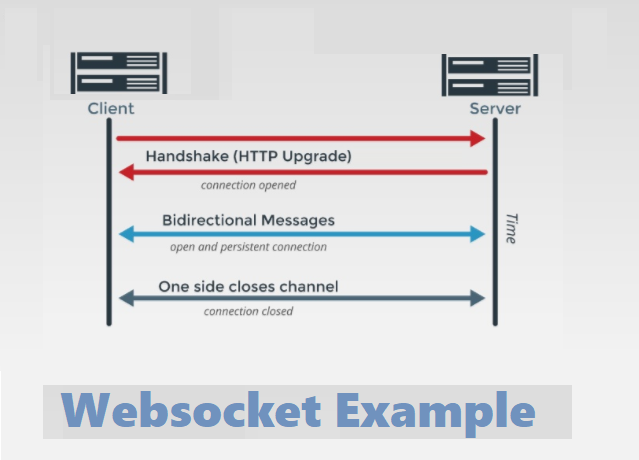


Abb. 8: Eröffnung einer WebSocket Verbindung (js-tutorials.com)

In vielerlei Hinsicht verhält sich WebSocket wie HTTP/2, jedoch auf einem höheren Level. Das bedeutet es gibt eine Schicht der Abstraktion zwischen direkter Socket Programmierung und dem Entwickler. So übernimmt die WebSocket API die Verwaltung des WebSocket Protokolls, stellt ereignisgetriebene Nachrichtenbehandlung zur Verfügung wie auch eine automatische Neuverbindung von Clients die einen Verbindungsabbruch erlitten haben. Somit vereinfacht die WebSocket API es eine solide Serverstruktur aufzubauen, ohne Entwicklern dabei die Kontrolle und Durchsicht zu nehmen. Zwei Eigenschaften die für die Entwicklung von Fudge wichtig sind.

WebSocket und seine API eignet sich daher gut für die Verbindung zu einem Server, da es effektiv arbeitet und die Serverstruktur nur schwach belastet, gleichzeitig aber für eine zuverlässige Verbindung sorgt durch die wichtigen Daten sicher übertragen werden können. Da WebSocket auf HTTP aufbaut und HTTP selbst von TCP abhängig ist, eignet sich WebSocket nur bedingt für die Verwendung in digitalen Spielen: Rundenbasierte Spiele können von der Websocket API verwaltet werden und zuverlässiger Datenaustausch ist gewährleistet, für große Datenmengen die rasant verschickt und verarbeitet werden müssen ist es allerdings nicht geeignet. Zudem leidet es ebenfalls unter potentiellen Netzwerkstaus.

3.1.3 Socket.io

Socket.io ist eine JavaScript Bibliothek. Es nutzt WebSocket als zugrundeliegende Technologie und baut darauf auf. Die Bibliothek ist dabei in zwei Teile getrennt, eine API für Clients, die auf JavaScript basiert und eine API für den Server die auf Node.js basiert.

Socket.io hat die gleichen Stärken und Schwächen die WebSocket mit sich bringt, allerdings fügt Socket.io eine weitere Automations- und Abstraktionsschicht hinzu. Dadurch werden grundlegende Funktionalitäten die in der Netzwerkkommunikation üblich sind versteckt. Für erfahre Entwickler ist Socket.io ein mächtiges Tool für schnelle Prototypen und übernimmt viele der zeitaufwändigeren Arbeiten, behindert aber den Lernfluss wenn Prinzipien der Netzwerkkommunikation vermittelt werden müssen.

Da Socket.io viele grundlegende Aufgaben übernimmt, ist es für Fudge nicht geeignet. Fudge soll dazu dienen angehenden Entwicklern eben jene grundlegenden Aufgaben zu übertragen und so Lösungsansätze und Funktionsweisen zu ersinnen und zu verstehen.

3.2 UDP Kommunikation

3.2.1 Datagram-Sockets

Datagram-Sockets sind eine Art von Netzwerksocket die ursprünglich aus der Programmiersprache Java stammt. Sie basieren auf UDP und erlauben daher unzuverlässige und verbindungslose Kommunikation zwischen Server und Client. Datagram Sockets sind auf einem sehr niedrigen Level, das heißt mit sehr geringer Abstraktion und Automation, angesiedelt. Dadurch bieten sie sich für erfahrene Entwickler an die so volle Kontrolle über die Funktion ihres Quellcodes behalten. So ist es dem Entwickler überlassen sämtliche Notwendigkeiten zu berücksichtigen und nach Bedarf zu implementieren. Durch diese Anforderung bieten sich sogenannte low-level Technologien hauptsächlich für erfahrene Programmierer an, die häufige Fallstricke vermeiden und soliden Quellcode produzieren können. Datagram-Sockets sind dementsprechend schwer zu erlernen und selbst einfache Funktionen, wie die automatische Wiederaufnahme einer Verbindung zu einem Client, können zu einer zeitintensiven Arbeit ausarten, die im Lernprozess nur bedingt zielführend ist.

Zudem kann JavaScript in einer Browserumgebung nicht direkt mit Datagram Sockets arbeiten. Dies ist auf Sicherheitsentscheidungen seitens der Browserentwickler zurückzuführen, die zuvor bereits erwähnt wurden.

Zu guter Letzt sind Datagram-Sockets zwar standardisiert, aber für die Verwendung in selbständigen Applikationen vorgesehen. Üblicherweise werden sie in Java Programmen Verwendung finden, nicht aber in Browserumgebungen.

Dementsprechend bietet sich die direkte Verwendung von Datagram-Sockets nicht für Fudge an, da Electron auf einer Browserumgebung basiert und mit Fudge produzierte digitale Spiele und Anwendungen auch in einer reinen Browserumgebung verwendbar sein müssen.

3.2.2 WebRTC

Ursprünglich von der Firma Global IP Solutions entwickelt ist WebRTC, der volle Name lautet Web Real-Time Communication, im Jahre 2010 in den Besitz von Google übergegangen und wird seit 2011 von einer Arbeitsgruppe der W3C standardisiert. Die Standardisierung findet mit Unterstützung von Google inc, der Mozilla Foundation und Opera Software ASA statt. Dies zeigt eindeutig den Bedarf nach einer Lösung für die UDP Kommunikation im Browser.

WebRTC ist ein offener Standard und eine Sammlung von Protokollen und APIs. Diese Sammlung soll die Netzwerk Kommunikation in Echtzeit zwischen Client-Client Verbindungen in Browserumgebungen ermöglichen. Es basiert unter anderem auf HTML5 und JavaScript. Die Datenübertragung erfolgt über sogenannte Datachannels (Datenkanäle) die mithilfe des neu eingeführten JavaScript Session Establishment Protocol (JSEP) ausgehandelt und etabliert werden.

Für die Verhandlung nutzt WebRTC sogenannte STUN und TURN Server, die entweder bereitgestellt werden müssen oder im kleinen Rahmen von Google verwendet werden können. Ein STUN Server liefert einem verhandelnden Client seine globale IP-Adresse zurück, der TURN Server dient als Rückfallmöglichkeit, sollte eine direkte Peer To Peer Verbindung nicht möglich sein. Beide Server müssen vor der Verhandlung festgelegt werden.

Die Verhandlung selbst wird über einen Webserver abgewickelt. Dieser leitet die notwendigen Informationen an den gewünschten Peer weiter.

Zuerst steht das Offer: Es bereitet den Peer auf die Verhandlung vor und liefert gleichzeitig das Session Description Protocol – Informationen über die verwendeten Datenströme – mit. Diese kann der „Angerufene“ Client um eine gültige Antwort zu generieren, die dem „Anrufer“ zugesendet wird. Der „Anrufer“ prüft diese Antwort und wenn sie gültig ist, beginnt der Austausch der Interactive Connectivity Establishment (ICE) Candidates – Verbindungsmöglichkeiten, die den Clients zur Verfügung stehen. Wurde ein gültiger ICE-Candidate etabliert, so ist die Verhandlung abgeschlossen und die Verbindung steht (Abb. 8)

WebRTC erlaubt dabei nicht nur den Austausch von beliebigen Daten über Datenkanäle, sondern erlaubt es auch über die gleiche Verbindung mithilfe weiterer Kanäle Video- und Audiodaten zu übertragen. Zudem ist WebRTC auf einem höheren Level angesiedelt als Datagram-Sockets, wodurch einige der grundlegenden Aufgaben von der API selbst übernommen werden, ohne jedoch die Grundfunktionen zu verstecken.

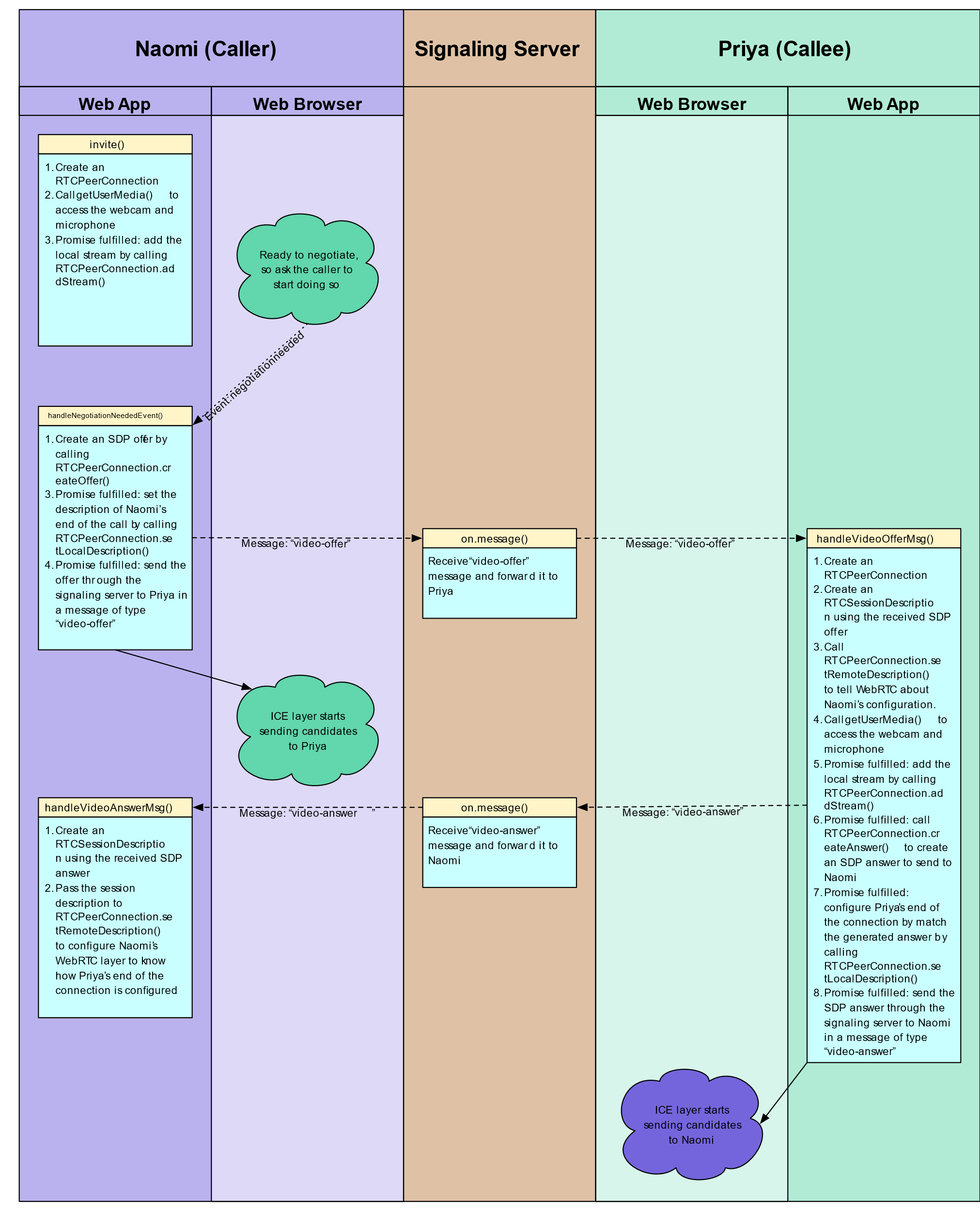


Abb. 9: Verhandlungsablauf einer WebRTC Verbindung (developer.mozilla.com)

Verbindungen sind reine Peer-To-Peer Verbindungen, das heißt jeder Kandidat muss sich mit jedem anderen Kandidaten zu einem zuvor erwähnten Mesh-Netzwerk verbinden (siehe Abb. 5). Durch die Kombination mit Electron lässt sich ein WebRTC Client-Server-Modell realisieren: Der Server läuft innerhalb einer Electron Umgebung und jeder Client erstellt eine Peer-To-Peer Verbindung mit dem Server selbst, nicht aber mit anderen Clients, die mit dem Server verbunden sind. So kann der Server sämtliche Client-Verbindungen bei sich zusammenführen und verwalten.

WebRTC sticht daher als bester Kandidat für die UDP-Kommunikation in digitalen Spielen hervor. Nicht nur können beliebige Datenformate verschickt werden, beispielsweise JSON, XML oder Binärdaten, zudem ist es sehr einfach Videostreams und Audiostreams zu versenden und zu empfangen, wodurch spielinterne Sprach- und Bildkommunikationssysteme entwickelt werden können. Außerdem ermöglicht die Kombination von Electron und WebRTC es sämtliche zuvor erwähnte Verbindungsstrukturen von digitalen Spielen abzudecken: Peer-To-Peer, unechtes Peer-To-Peer und sogar Client-Server Strukturen.

3.3 Evaluation und Auswahl Webtechnologien

Bei der UDP-Kommunikation fällt die Auswahl der zu wählenden Technologie sehr leicht: Außer WebRTC gibt es kein standardisiertes und universell unterstütztes Format für die UDP-Kommunikation in Browserumgebungen. Durch Sicherheitsbedenken ist JavaScript ohne einen Mittelmann nicht in der Lage UDP-Packets zu versenden, daher bietet es sich auch nicht an ein eigenes Protokoll zu entwickeln Außerdem ist WebRTC zukunftssicher und von den großen Browseranbietern standardisiert.

Im Bereich der TCP-Kommunikation gibt es mehrere Kandidaten zur Auswahl, namentlich WebSocket und HTTP/2. WebSocket besticht dabei durch Popularität, eine sehr ausführliche Dokumentation und einfache Verwendung. Es ist dadurch besonders geeignet für unerfahrene Entwickler. HTTP/2 bietet ähnliche Funktionalitäten wie WebSocket an, namentlich die bi-direktionalität und Multiplexing, ist aber auf einem niedrigeren Level angesiedelt und dadurch in der Anwendung aufwändiger.

Beide Technologien sind als zukunftssicher zu betrachten, HTTP/2 als Neuentwicklung, die von den Browseranbietern vorangetrieben wird, WebSocket als stabiles und etabliertes Protokoll für das viele Bibliotheken existieren.

Die Entscheidung für die TCP-Kommunikation ist daher Ermessenssache und fällt aufgrund der ausführlichen Dokumentation und dem geringen, aber hilfreichen Level, an Automation auf WebSocket.

|  |  |
| --- | --- |
| Netzwerkteilnehmer | Baut auf, auf: |
| Server | Electron + Node.js + TypeScript |
| Client | Electron + TypeScript |
|  |  |
| **TransportMethode** | **Gewählte Technologie** |
| TCP | WebSocket |
| UDP | WebRTC |

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Entwicklung vorgestellt. Dazu gehört die Festlegung von Interfaces zur allgemeingültigen Strukturieren der Komponenten, die Implementierung von unterstützenden Klassen, sowie eine beispielhafte und funktionstüchtige Implementation jeder zuvor vorgestellten Netzwerkstruktur die in einem Spiel Anwendung finden könnte.

Der Zugriff auf die einzelnen Komponenten untereinander erfolgt über das TypeScript eigene „Barrel“ System: Jeder Ordner der Projektstruktur erhält ein eigenes „Barrel“ – eine TypeScript Datei mit namen index.ts die alle gewollten Module reexportiert und es ermöglicht alle Module zu importieren, indem die index.ts importiert wird. Das Barrel-System erlaubt außerdem eine moderne Art von Namespacing, da die Barrelgruppe mit einem selbstgewählten Namen importiert werden kann.

Die Ordnerstruktur des Projekts ist im Anhang zu finden.

4.1 Client Manager Interfaces

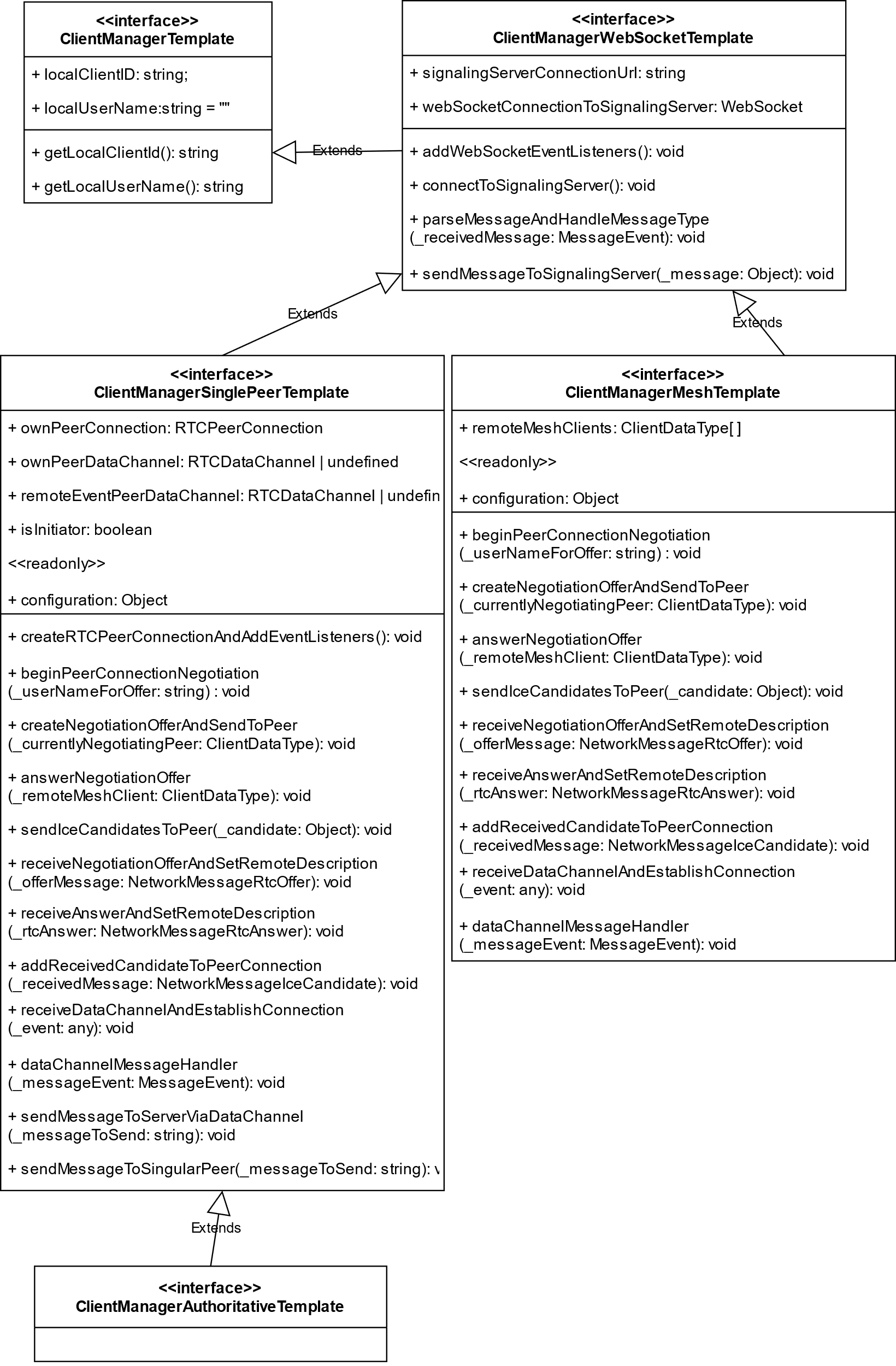


Abb. 10: UML der ClientManagerTemplates in Fudge (Eigene Darstellung)

Im Rahmen der Netzwerkkommunikation fungieren die Client Manager Klassen als Dreh und Angelpunkt der Clients, derer Netzwerkteilnehmer, die sich in irgendeiner Form im Netzwerk beteiligen und keine Server sind. Sie lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: Diejenigen Client Manager, die ausschließlich über WebSocket-Verbindungen kommunizieren, und diejenigen Client Manager die zusätzlich zu ihrer WebSocket Verbindung eine WebRTC etablieren können und sollen.

Für jede Netzwerkstruktur steht ein eigenes Interface zur Verfügung:

* Client Manager WebSocket - reine WebSocket Verbindungen
* Client Manager Mesh Network - Mesh Netzwerke über WebRTC
* Client Manager Single Peer - Peer To Peer Verbindungen zwischen zwei Clients
* Client Manager Authoritative – Peer To Peer zwischen Client und dediziertem Server

Klassen, die diese Interfaces implementieren sind für die Repräsentation eines Clients im Netzwerk zuständig. Muss eine netzwerkgetriebene Funktionalität umgesetzt werden, muss diese über einen Client Manager abgewickelt werden.

Ihr Aufbau ist als UML-Diagramm dokumentiert (siehe Abb. 9 TODO) und wird nachfolgend erläutert.

4.1.1 Client Manager

Interfaces, im Deutschen “Schnittstellen“, definieren was eine Klasse können muss, aber nicht wie sie es tut. Als solches dienen Schnittstellen als eine Art Bauplan, nach denen sich Klassen, die diese Interfaces implementieren, richten müssen.

Das ClientManagerTemplate ist ein solches Interface. Es definiert auf dem untersten Level welche Variablen und Funktionen ein Client im Netzwerk zur Verfügung haben muss. Vom ClientManagerTemplate werden weitere Interfaces für die verschiedenen Netzwerkstrukturen abgeleitet (siehe Abb. 9 TODO).

Die Variable, die ein Client Manager in jedem Fall bereitstellen muss, ist eine localClientID – eine einzigartige Folge von Zeichen die den Client im Netzwerk eindeutig identifizieren. Optional kann der Client Manager einen localUserName bereitstellen. Zu Beidem gehören jeweilige Getter Methoden.

4.1.2 Client Manager WebSocket

Das ClientManagerWebSocketTemplate legt die benötigten Variablen und Funktionen für einen reinen WebSocket Client fest. Es bezieht sich also auf einen Client ohne die Fähigkeit sich über WebRTC mit Peers zu verbinden. Es leitet sich aus dem ClientManagerTemplate ab (siehe Abb. 9 TODO).

Die Implementation dieses Interfaces ist notwendig in Applikationen, bei denen zuverlässige Datenübertragung via TCP gewünscht ist. Durch die Verwendung von WebSocket ist sie außerdem für schnelle Prototypen geeignet, beispielsweise um ein Konzept zu testen (Proof of Concept). Die Verhandlung (vergleiche Abb. 10) erfolgt via HTTP-Handshake in Folge dessen eine TCP-Verbindung etabliert und aufrechterhalten wird, über die anschließend WebSocket Nachrichten verschickt werden können.

Erforderlich für einen WebSocket Client ist es EventListener – Funktionen, die auf die Ausführung eines Events warten und von diesem aufgerufen werden – festzulegen. Für eine WebSocket Verbindung sind das die Events „open“ – Eine Verbindung wurde eröffnet - „close“ – eine Verbindung wurde geschlossen - und „message“- eine Nachricht wurde über die Verbindung erhalten. Zusätzlich muss der Client sich mit dem WebSocket Server verbinden können, sowie eine Möglichkeit haben erhaltene Nachrichten – üblicherweise als JSON-String verschickt – in NetworkMessage Objekte zu parsen. Als letzte erforderliche Funktion muss der Client eine Nachricht an den WebSocket Server schicken können.

4.1.3 Client Manager Mesh

Das ClientManagerMeshTemplate legt fest, wie ein ClientManager für die Verwendung in einem Meshnetwork aufgebaut sein muss.

Zusätzlich zu den Daten und Funktionalitäten die ein normaler WebSocket ClientManager benötigt, kommen nun auch WebRTC Funktionen hinzu. Ein ClientManagerMesh muss in der Lage sein, die Verhandlung für die Etablierung einer WebRTC Verbindung zu beginnen (siehe TODO), ein Angebot zu versenden, eine Antwort zu empfangen und abschließend seine ICE-Candidates an den Empfänger zu senden und die des Empfängers anzunehmen.

Auf der anderen Seite muss der ClientManager in der Lage sein ein Angebot zu erhalten, es zu verarbeiten, eine Antwort vorzubereiten, den Austausch von ICE-Candidates zu verwalten und den etablierten Datachannel mithilfe des ‚datachannel‘ Events zu erhalten (siehe Abb. 9 TODO).

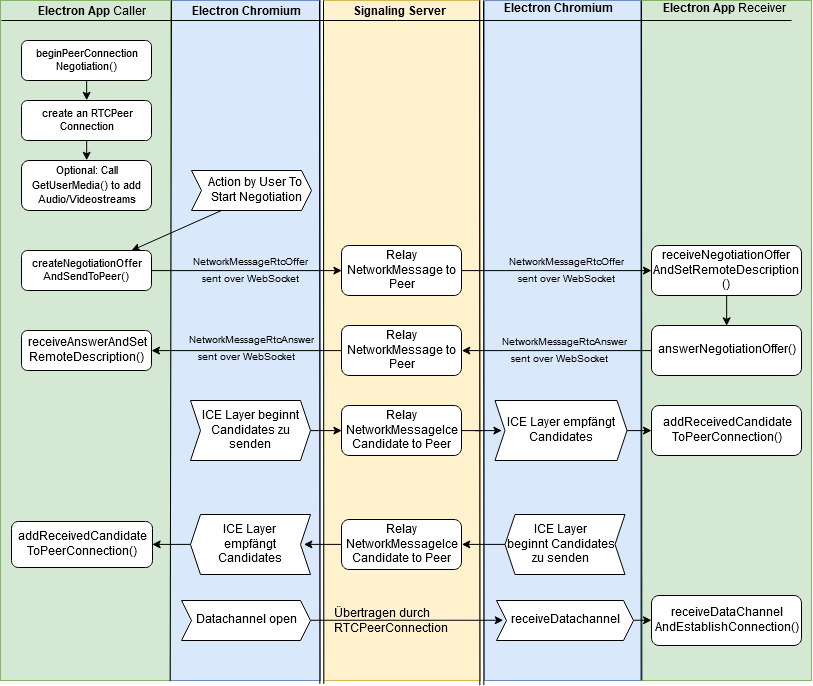


Abb. 11: WebRTC Verhandlungs Implementation in Fudge (eigene Darstellung)

4.1.4 Client Manager Single Peer

Zu einem großen Teil überlappen sich die Interfaces des Mesh Template und des SinglePeer Template, allerdings fallen sämtliche Listen weg und werden stattdessen durch einzelne Instanzen von RTCPeerConnections ersetzt. Außerdem muss dem ClientManager ein boolean ‚isInitiator‘ zur Verfügung stehen. Es muss also bei der Implementation zwischen Caller und Receiver unterschieden werden, um die passenden Eventhandler auf die RTCConnection zu setzen. Der Caller kann auf das „datachannel“ Event verzichten (siehe Abb. 11 TODO) , der Receiver dagegen nicht. Zusätzlich muss unterschieden werden welcher RTCPeerConnection und RTCDataChannel zur Kommunikation angesprochen werden muss.

4.1.5 Client Manager Authoritative Peer

Für den Client in einer Client-Server Struktur besteht kein Unterschied zwischen einem Peer – einem gleichgestellten Netzwerclient – und einem Authoritative Server. Der Peer verbindet mit einem einzigen Netzwerkclient, dem Server. Wird die Komponente weiter ausgebaut sollte allerdings zwischen Single Peer und Authoritative Peer unterschieden werden können.

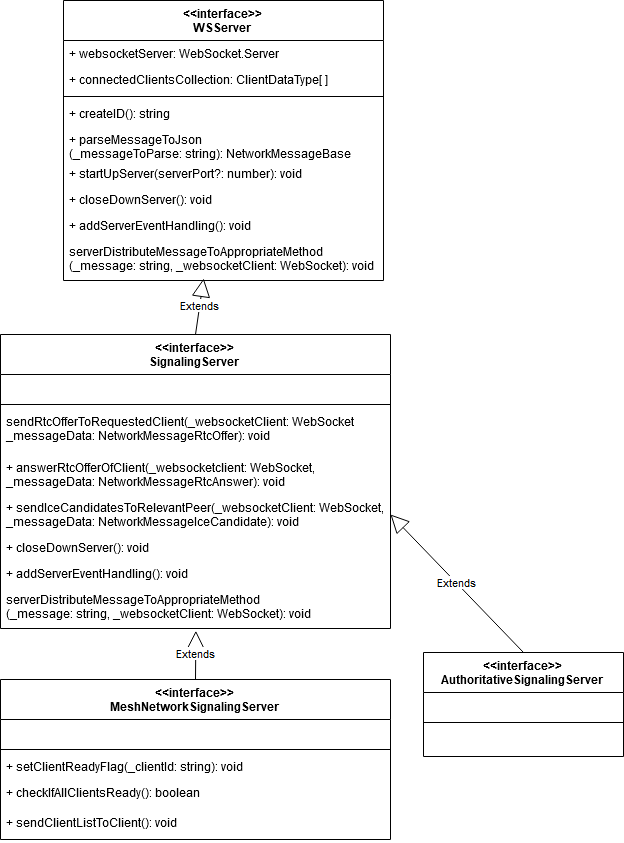
4.2 Fudge Server Interfaces

In der Netzwerkkommunikation von Fudge stellen die Fudge Server Interfaces das Gegenstück zu den Client Manager Interfaces dar: Sie definieren die notwendigen Variablen und Funktionen die verschiedene Serverstrukturen zur Verfügung stellen müssen. Namentlich wird unterschieden zwischen:

* WebSocket Server
* WebRTC Signaling Server
* Mesh Network Signaling Server
* Authoritative Signaling Server

Das WSServer Interface dient als Grundlage aller Server, da immer wenigstens eine WebSocket Verbindung ermöglicht werden muss. Andernfalls ist keinerlei Kommunikation über das Netzwerk möglich.

Komponenten die als Netzwerkserver für Client Manager agieren sollen, sollten ein Interface implementieren, welches sich vom WSServer Interface ableitet.



4.2.1 WSServer Interface

Das WSServer Interface definiert die notwendigen Funktionen für einen WebSocket Server (Basisserver) im Kontext Fudge.

Es muss ermöglicht werden verbundene Clients in einer Liste zusammenzufassen und ihnen eine einzigartige ID zuweisen zu können. Außerdem muss ein Basisserver Start- und Stoppbar sein, sowie Nachrichten zu den korrekten NetworkMessage Objekten zu parsen und diese anschließend korrekt zu verarbeiten.

4.2.2 Signaling Server Interface

Signaling Server ist ein Ausdruck, der sich speziell für WebRTC etabliert hat. Es handelt sich dabei um einen Server, der die WebRTC Verhandlung (siehe abb TODO) ermöglichen kann, also RtcOffer, RtcAnswer und IceCandidates an die gewünschten Clients weiterleiten kann. Der Signaling Server arbeitet zu diesem Zweck mit WebSocket, da diese Nachrichten zuverlässig ankommen müssen. Datenverluste können zum Fehlschlagen der Verhandlung führen. Ist die Verhandlung abgeschlossen kann die Verbindung des Servers zu den Clients beendet werden.

4.2.3 Authoritative Signaling Interface

Dieses Interface unterscheidet sich zum Zeitpunkt dieser Arbeit nur durch die schlussendliche Implementation im Quellcode. Es muss die gleichen Funktionalitäten liefern wie ein normaler Signaling Server, muss aber die Verbindungen an einen Fudge Server Authoritative Manager weiterleiten.

4.2.3 Mesh Network Interface

Das Mesh Network Interface leitet sich aus dem Signaling Server Interface ab (siehe TODO) und garantiert so die Signaling Funktionalitäten für WebRTC. Dazu kommt die Fähigkeit Clients die bereit sind eine Mesh Verbindung einzugehen von denen die es nicht sind zu unterscheiden. Dies ist wichtig, da ein Mesh Netzwerk zwischen allen partizipierenden Clients aufgebaut werden muss. Es ist also an den Clients ihre Bereitschaft dafür zu signalisieren.

Haben alle Clients ihre Verbindungsbereitschaft deklariert, beginnt der Verbindungsaufbau, der beispielhaft mit fünf Clients in Abbildung TODO dargestellt wird. Diese Methode ist nur durch die maximal verwaltbare Anzahl an RTCPeerConnections limitiert und skaliert linear.

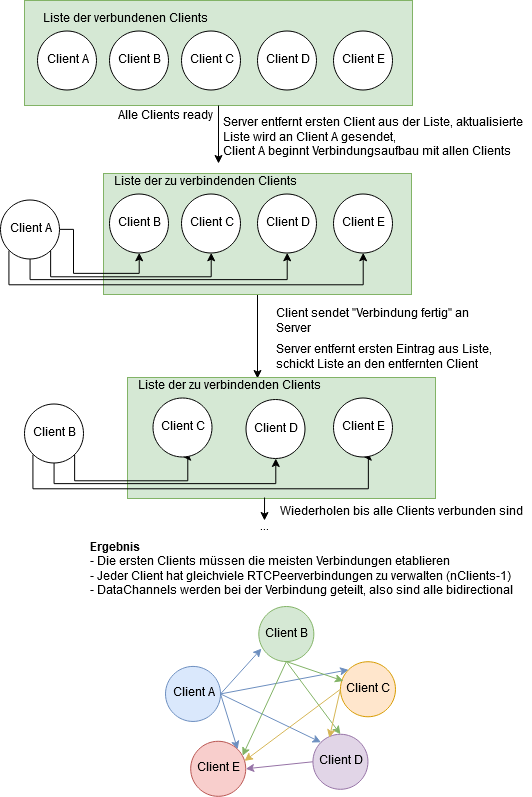


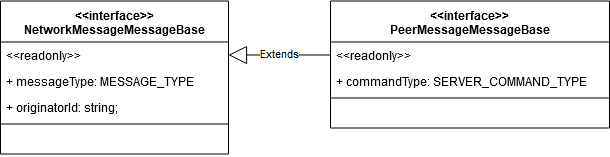
Abb. 12: Aufbau eines Meshnetzwerks in Fudge TODO

4.3 Network Message Interfaces

Die Network Message Interfaces sollen Informationseinheitlichkeit sicherstellen. Besonders bei den Networkmessages ist dies von entscheidender Bedeutung, da nur so eine standardisierte Weiterverarbeitung von Server oder anderen Cliens gewährleistet werden kann. Netzwerknachrichten sind eine Datenklasse, die keine eigenen Funktionen besitzt.

Zwei Arten von Nachrichten werden unterschieden:

* Network Messages - Nachrichten für WebSocket Verbindungen
* PeerMessages – Nachrichten für WebRTC Datachannel



Somit kann zwischen Nachrichten für die Etablierung von Verbindungen und Nachrichten für den Austausch von Applikationsrelevanten Informationen unterschieden werden. Sie unterscheiden sich dabei in einem zusätlichen Enumerator SERVER\_COMMAND\_TYPE (vergleiche TODO) der Peer Messages eigen ist und die limitierte Kontrolle von Serververhalten ermöglicht.

4.3.1 Network Message Message Base

Entscheidendes Merkmal einer Netzwerknachricht ist es, einen Absenderidentifikator zu haben und einen Typ zu besitzen, der die Art der Nachricht festlegt. So können Nachrichten eindeutig zugeordnet werden und die Verarbeitung kann gezielt kontrolliert werden.

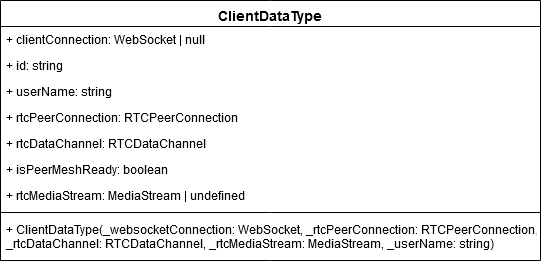
4.3.2 Peer Message Message Base

Zusätzlich zu dem IDentifikator und dem NachrichtenTyp kommt bei einer Peer Message ein Enumerator für den SERVER\_COMMAND\_TYPE hinzu. Dies erlaubt die gesonderte Behandlung von Clientbefehlen die dem Server zugedacht sind. Ein Beispiel dafür ist das Kommando ein Objekt auf dem Server zu erschaffen, dem Objekt eine eigene ID zuzuweisen und es dem Absender des Befehls zuzuordnen.

4.4 Datenklassen

Bei den Datenklassen handelt es sich um Klassen die Daten entweder strukturieren oder für die Verwendung sammeln. Sie sind für die Struktur wichtig, könnten aber auch ersetzt oder anders implementiert werden.

4.4.1 ClientDataType



Die in Abbildung TODO dargestellte Klasse erlaubt es Clients im Netzwerk zu definieren und alle relevanten Informationen zentral zu speicher, beispielsweise auf dem Server. So können IDs, Connections und UserNames zugeordnet werden um den vollständigen Client zu finden und weiter zu verarbeiten.

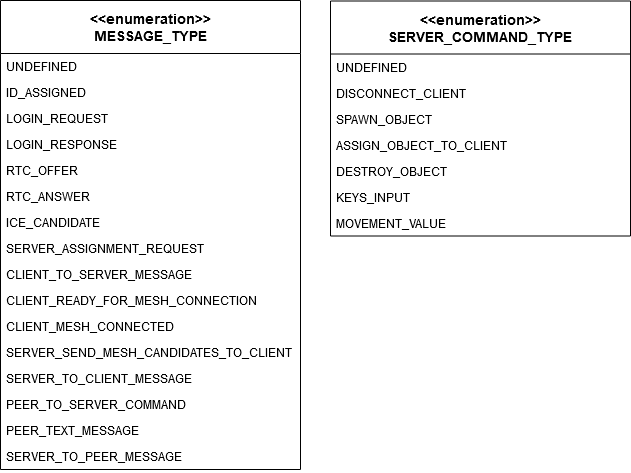
4.4.2 Enumerators

Zum Abschlusszeitpunkt der Arbeit gibt es zwei Enumerator Arten:

* MESSAGE\_TYPE – Denunziert die Art und Struktur einer Nachricht
* SERVER\_COMMAND\_TYPE – Denunziert den Befehl, den eine Nachricht beinhaltet

Die Enumeratoren werden als readonly Property der NetworkMessage Interfaces interpretiert. Sie werden in der Klassendeklaration festgelegt, nicht über den Konstruktor. So ist jede Nachricht eindeutig markiert und ihr Type oder Command können während der Laufzeit nicht verändert werden.

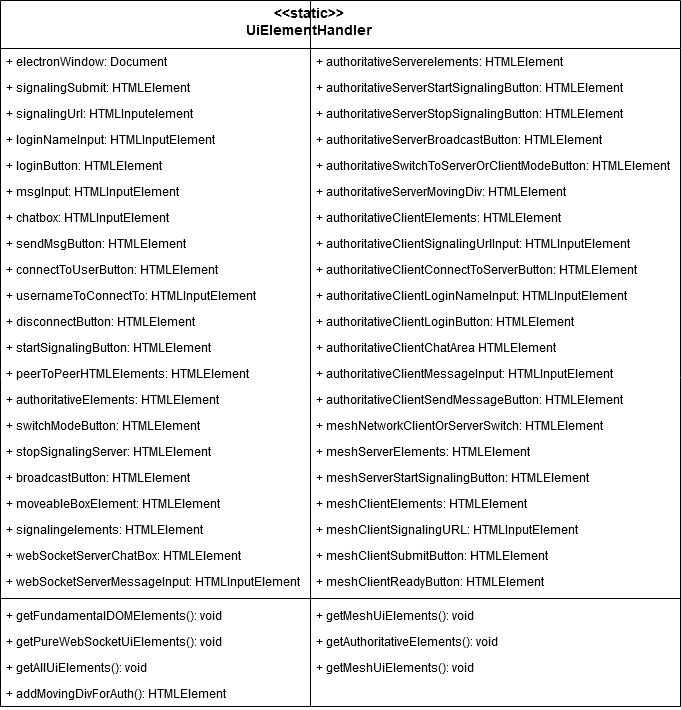
Nicht alle Enumeratorwerte finden Anwendung; Diese dienen als Anhaltspunkte für mögliche Erweiterungen, die vom Entwickler vorgenommen werden können.



4.4.3 UiElementHandler

Diese statische Klasse dient als zentrale Sammelstelle für HTML-Elemente. So ist es dem Client und dem Server gleichermaßen möglich auf UI-Elemente zuzugreifen und ihre Events abzufangen oder auszulösen. In der ersten Iteration dient der UIElementHandler vor allem dazu, alle relevanten HTML-Elemente zu finden und so die Beispiele funktiontstüchtig zu machen. Außerdem fügt er für jeden neuen Client der dem Authoritative Server beitritt ein steuerbares Quadrat ein.

Der UIElementHandler ist nicht systemkritisch und kann gelöscht oder ersetzt werden. Funktionen der Netzwerkkomponenten müssen dann anderweitig angesprochen werden.



4.5 Electron Eintrittspunkte

Bei den Electron Eintrittspunkten handelt es sich um diejenigen Klassen, die innerhalb der HTML-Dateien eines Electron Programms aufgerufen werden. In Electron Tutorials werden diese zumeist als „renderer.ts“ bezeichnet.

Zusätzlich gibt es noch die, meist als „main.ts“ betitelte, Klasse, in der Electron in der Lage ist Fenster zu öffnen und diese zu formatieren, beispielsweise in der Höhe und Breite. In dieser wird auch die erste HTML-Datei aufgerufen die der Nutzer sieht.

Ist die main.ts der Startpunkt, so ist die renderer.ts die Rennstrecke auf der alles passiert.

Zu finden sind diese Dateien im Ordner Scenes (siehe Anhang: Projektstruktur).

4.5.1 Fudge Network Entry Point

Diese Datei bezeichnet den Eintrittspunkt in die FudgeNetwork Beispielprogramme. Sie öffnet ein Fenster und ruft in diesem die „ChooseExample.html“ auf.

4.5.2 Example Networkstructure

Die Dateien die diesem Namensschema folgen stellen die „renderer.ts“ für die verschiedenen Beispiele dar. Sie werden in den korrespondierenden HTML-Dateien eingebunden.

Möchte der Entwickler ein neues Programm entwickeln, so kann eine neue Datei in diesem Schema aufgebaut und eingebunden werden.

4.5 Reine WebSocket Implementation

4.2.1 Client Manager – WebSocket



4.6 Single Peer Implementation

4.7 Authoritative Server Implementation

4.8 Mesh Network Implementation

4. Praktische Anwendung

Neue Nachrichten abfangen

Clientslogik einbauen

Authoritative Commands strukturieren

Ids für netzwerkobjete vergeben

5. Diskussion und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden funktionierende Netzwerkkomponenten für die Game-Engine Fudge konzipiert und implementiert. Das Ergebnis zeigt, dass entsprechend der Spezifikationen von WebRTC und Chromium, UDP Kommunikation direkt zwischen Peers möglich ist, und sogar eine Serverstruktur aufgebaut und in Electron implementiert werden kann. Die Verwendung von TypeScript hat die Fehlersuche stark vereinfacht und es erlaubt, einfache Strukturen zu erstellen, die Skalierbarkeit, Wartbarkeit und Modularität gewährleisten Dies zeigt auch eine gewisse Flexibilität in der Herangehensweise. Die hier erstellten Komponenten könnten anderweitig umgesetzt werden, auch wenn die Kommunikation mit dem UDP-Protokoll in einer Browserumgebung ausschließlich über WebRTC erfolgen kann.

In dieser Arbeit wurde dabei die grundlegende Erstellung von Kommunikationswegen über UDP zwischen zwei Clients, seien beide Peers oder sei es eine Client-Server Struktur, fokussiert. Die Kombination von Webtechnologien mit Servertechnologien im Rahmen einer Browserumgebung hat aufwendige Fehlersuche notwendig gemacht. Die Kommunikation über UDP innerhalb einer modernen Browserumgebung ist aus Sicherheitsgründen eigentlich unmöglich gemacht. Dadurch sind entgegen der Erwartungen Algorithmen zur Serverseitigen-Prediction, dem Austausch von Gamestates und weitläufigen Lobbysystemen im Rahmen der Arbeit nicht möglich gewesen.

Gleichzeitig bieten sich die Komponenten für weiterführende Arbeiten an, beispielsweise um serverseitige Prediction zu konzipieren und umzusetzen, Lobbysysteme zu entwickeln und serverseitige Gamestate Validierung zu implementieren. Zudem können potentiell spezialisierte Netzwerkprotokolle entwickelt werden, die genau auf die didaktischen Anforderungen von Fudge zugeschnitten sind und so die Abhängigkeit von UDP umgehen. Außerdem können optimierte Kommunikationswege erarbeitet werden, die die Latenz bei der Kommunikation zwischen Clients und Server weiter reduziert.

Die für diese Arbeit verwendeten Technologien sind weltweit anerkannt und viel genutzt, beispielsweise JavaScript und Chromium, beide unterstützt durch den Technologiekonzern Google, TypeScript entwickelt von Microsoft, und Electron dass auf Technologie von Microsoft basiert. So besteht für Fudge keine Gefahr in näherer Zukunft obsolete Webtechnologien oder Komponenten deren Kompatibilität nicht mehr gegeben ist zu beherbergen.

Wie können die komponenten selbst weiterentwickelt werden z.b, durch

**server prediction,**

**lazy loading,**

**nachrichten validierung,**

**werte validierung**

Eidesstaatliche Erkärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Thesis selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe. Alle verwendeten Quellen und Hilfsmittel, sind angegeben.

Ort und Datum Unterschrift

Furtwangen, den.